

## § 8. Некоторые опыты по обнаружению корпускулярных свойств света

1 А. Ф. Иоффе (1880—1960) и Н. И. Добронравов (1891—1949) в 1925 г. экспериментально подтвердили квантовую картину фоноэфекта, о которой говорилось в § 2. Вместо видимых и ультрафиолетовых лучей они пользовались рентгеновскими лучами, кванты которых много крупнее. В их опытах микроскопическая пылинка, заряжавшаяся и перезаряжавшаяся при освещении рентгеновскими лучами, уравновешивалась в электрическом поле конденсатора, аналогичного тому, с помощью которого Милликен определял заряд электрона. Пока заряд пылинки оставался постоянным, она неподвижно висела в электрическом поле конденсатора и наблюдалась сбоку с помощью микроскопа. Но если пылинку освещали слабым потоком рентгеновских лучей, то происходил фотоэффект. Время от времени на пылинку попадал рентгеновский квант, освобождавший электрон. Заряд пылинки менялся на заряд одного электрона, и пылинка выходила из равновесия. На опыте оказалось, что именно такой квантовой картине фотоэффекта соответствовало поведение пылинки.

На рис. 14 показана схема опыта Иоффе и Добронравова. В толстой эбонитовой пластинке просверлены отверстия  $L$  и  $R$ . Через отверстие  $R$  из образовавшейся полости откачивался воздух, чтобы полость стала прозрачной для ультрафиолета. Через отверстие  $L$ , закрывающееся кварцевым окошком, проходили ультрафиолетовые лучи, освещавшие конец алюминиевой проволочки  $K$  с диаметром 0,2 мм. Образовавшиеся фотоэлектроны ускорялись электрическим напряжением 12 000 В, приложенным между проволочкой и алюминиевой фольгой  $A$ , закрывающей полость сверху. Толщина фольги ( $\sim 5 \cdot 10^{-3}$  мм) подбиралась так, что она практически не поглощала рентгеновские лучи, возбуждавшиеся в ней при торможении электронов. Освещение кончика проволочки  $K$  подбиралось настолько слабым, что число фотоэлектронов и связанных с ними рентгеновских импульсов составляло около 1000 в секунду.

Алюминиевая фольга одновременно служила нижней обкладкой конденсатора. От нее на расстоянии примерно 0,02 см уравновешивалась висмутовая пылинка  $W$  размером около  $6 \cdot 10^{-5}$  см.

Опыты показали, что в среднем раз в 30 минут пылинка выходила из равновесия, т. е. с такой средней частотой рентгеновские лучи вырывали из нее электрон. В течение указанного времени образовывалось около  $N = 30 \cdot 60 \cdot 1000 = 1,8 \cdot 10^6$  рентгеновских импульсов. По классическим представлениям энергия каждого импульса должна распространяться во все стороны в виде сферической волны. Каждый из таких импульсов отдавал бы пылинке ничтожную часть своей энергии из-за малости телесного угла, под которым пылинка видна из ближайшего места фольги, где возбуждались рентгеновские лучи. Кроме того, эта энергия распределялась бы между множеством электронов пылинки. При таких условиях было бы совершенно невероятно, чтобы в течение 30 минут большая доля энергии электронов пылинки сосредоточилась только на одном электроне, который должен вылететь из пылинки. Ясно, что с точки зрения классической волновой теории результаты опытов Иоффе и Добронравова непонятны. Напротив, в квантовой теории они вполне естественны.

Следующее элементарное вычисление показывает, что квантовая интерпретация явления выдерживает количественную проверку. Если считать, что

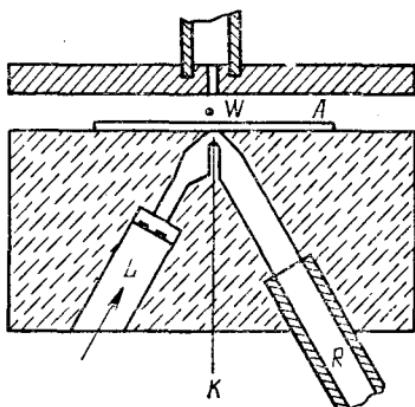


Рис. 14

для рентгеновского фотона все направления движения после вылета равновероятны, то вероятность попадания фотона в пылинку будет равна  $\Omega/4\pi$ , где  $\Omega$  — телесный угол, под которым пылинка видна из точки, откуда исходят рентгеновские лучи. Если ежесекундно источник испускает в среднем  $n$  фотонов, то за время  $t$  он испустит  $N = nt$  фотонов. Из них на пылинку попадет в среднем  $N \Omega/4\pi = nt \Omega/4\pi$  фотонов. Среднее время  $t$ , в течение которого на пылинку попадает один фотон, определится из условия  $nt \Omega/4\pi = 1$ , откуда

$$t = 4\pi/n\Omega.$$

В опытах Иоффе и Доброравова было  $n = 1000 \text{ с}^{-1}$ ,  $\Omega = (\pi/4)(6 \cdot 10^{-5}/0,02)^2$ , если пылинку считать шариком. Подстановка этих значений в предыдущее выражение дает  $t \approx 1800 \text{ с} = 30 \text{ ми}$ , что согласуется со временем, наблюдавшимся в опытах Иоффе и Доброравова.

2. По классическим представлениям лучистая энергия распространяется от источника в разные стороны одновременно. Но это не так, если распространение происходит квантами. Отдельные кванты испускаются независимо друг от друга. Этот эффект, если он действительно существует, должен быть выражен тем отчетливее, чем крупнее кванты. Для его обнаружения на опыте Боте (1891—1957) в 1924 г. пользовался рентгеновскими лучами.

В опытах Боте кванты излучения обнаруживались счетчиками Гейгера (1882—1945). Счетчик Гейгера представляет собой маленький цилиндрический конденсатор  $A$ , наполненный газом под давлением в несколько мм рт. ст. (рис. 15). Внутренней обкладкой конденсатора служит тонкая металлическая нить, натянутая вдоль оси цилиндра, или тщательно заточенное металлическое остряе, укрепленное внутри цилиндра на изоляторе. Внутренняя и наружная обкладки конденсатора соединены через батарею  $B$  и очень большое сопротивление  $R$ , нижний конец которого заземлен. Таким образом,

между обкладками конденсатора поддерживается разность потенциалов около 1000 В. Вблизи нити или острия создается сильное резко неоднородное электрическое поле. Если в счетчик попадает какая-либо частица (в том числе и фотон), то она ионизует молекулы газа. Образовавшиеся электроны и ионы ускоряются этим полем и при столкновениях с молекулами газа сами ионизируют их. Новые ионы и электроны также ускоряются, и т. д. Возникает электронно-ионная лавина, через счетчик проходит импульс электрического тока заметной силы. Из-за этого приложенное напряжение перераспределяется. Основная часть напряжения будет приходиться на сопротивление  $R$ , а напряжение на конденсаторе счетчика упадет почти до нуля. Ток через счетчик прекратится, напряжение на конденсаторе возрастет, счетчик вернется в рабочее состояние. Импульс электрического тока, прошедший через счетчик, можно обнаружить чувствительным электрометром  $E$ , присоединенным к внутренней обкладке конденсатора счетчика. По этим импульсам можно регистрировать (считать) каждую отдельную частицу, вызвавшую первичную ионизацию газа, если только время зажигания разряда меньше времени между попаданиями в счетчик двух последовательных частиц. Современные счетчики снабжены автоматически действующими устройствами, производящими такую регистрацию. Счетчик Гейгера сыграл и продолжает играть большую роль при изучении ядерной физики, космических лучей, элементарных частиц и пр.

В опыте Боте применялись два быстродействующих счетчика  $C_1$  и  $C_2$  (рис. 16), регистрировавших прохождение каждого рентгеновского кванта. Симметрично между счетчиками помещалась тонкая железная или медная фольга  $A$ . Фольга освещалась сбоку рентгеновскими лучами  $R$  достаточной жесткости и благодаря этому сама становилась источником характеристического рентгеновского излучения (рентгеновская флуоресценция). Попадание

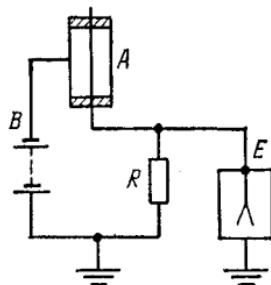


Рис. 15

рентгеновского кванта в один из счетчиков вызывало немедленное (менее чем через 0,001 с) вздрагивание нити электрометра. Такие вздрагивания регистрировались автоматически на движущейся ленте. Если бы из источника  $A$  во все стороны распространялись волны, как того требует классическая теория, то срабатывания счетчиков происходили бы одновременно и согласованно (с малыми случайными вариациями). Если же источник  $A$  испускал бы рентгеновские кванты вправо и влево беспорядочно и независимо, то срабатывания счетчиков были бы также беспорядочными во времени и независимыми. Опыт показал, что все происходит так, как если бы рентгеновское излучение флуоресценции распространялось в виде квантов, случайно направленных то к правому, то к левому счетчику. Так и должно быть по квантовым представлениям.

3. В обоих описанных опытах, по существу, изучались *флуктуационные явления* в слабых потоках рентгеновского излучения. Наблюдать анало-

гичные явления с видимым светом затруднительно из-за малой величины световых квантов в этой области спектра. Чувствительность существующих объективных методов регистрации еще недостаточна, чтобы регистрировать отдельные кванты видимого света. Наблюдения слабых световых потоков проводил С. И. Вавилов. Он воспользовался тем, что периферические участки сетчатки человеческого глаза (палочки), достаточно долго пребывшего в темноте, обладают необходимой чувствительностью к слабому свету, с которым приходилось иметь дело на опыте. Вавилов воспользовался также существованием порога зрительного ощущения. Если число квантов, попадающих при кратковременной вспышке на периферический участок сетчатки, превышает некоторую минимальную величину  $n_0$ , то глаз видит вспышку. Если же оно меньше  $n_0$ , то вспышка не видна совсем. По оценке Вавилова  $n_0$  составляет всего несколько десятков и, возможно, даже несколько квантов. Существование порога зрительного ощущения систематически использовалось Вавиловым при изучении люминесценции и вместе с Черенковым при открытии явления, носящего их имя. Используя указанные свойства глаза, Вавилов разработал чувствительный метод визуальных наблюдений флуктуаций интенсивности видимого света в слабых световых потоках. В результате многолетних экспериментальных исследований таких флуктуаций Вавилов пришел к заключению, что они происходят аналогично флуктуациям числа молекул газа, т. е. так, как если бы свет состоял из конечных порций, или квантов.

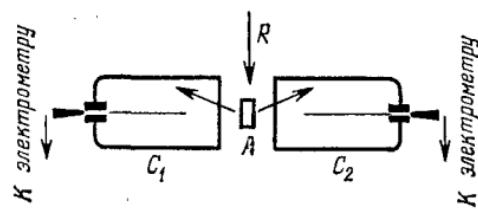


Рис. 16